

ЭППТ 2018



ACED 2018

УДК 62 – 51: 62 – 526: 629.423.3

УПРАВЛЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С СИНХРОННОЙ МАШИНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

MANAGEMENT OF THE SYNCHRONOUS MACHINE OF ELECTROMAGNETIC EXCITATION OF ELECTRIC DRIVE

Симаков Геннадий Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета. Россия, 620092, г. Новосибирск, Проспект К. Маркса 20,

E-mail: Simakov44_86@mail.ru. Тел.: +79059453923

Филюшов Юрий Петрович кандидат технических наук, ведущий инженер ФГУП ПО «Север» объединения РОСАТОМ. Россия, 620077, г. Новосибирск,

E-mail: filushov@mail.ru. Тел.: +79059453923.

Филюшов Владислав Юрьевич, аспирант кафедры автоматики и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Россия, 620092, г. Новосибирск, Проспект К. Маркса 20.

G. M. Simakov, Doctor Sc., Novosibirsk State technical University, 630073, Karla Marksa, prospect 20, Novosibirsk, Russian Federation. E-mail: Simakov44_86@mail.ru. Тел.: +79059453923

U. P. Filushov, Cand. Sc., Federal State Unitary Enterprise Production Association «Sever», 630092 Obyedineniy street 3, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: filushov@mail.ru. Тел.: +79059453923

V. Yu. Filushov, Post graduate student, Novosibirsk state technical University. 20 prospect Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. e-mail

Аннотация: В работе рассматривается применение метода синтеза многомерного управления синхронной машиной с электромагнитным возбуждением быстродействующего электропривода. Используя вариационные методы и метод обратной модели для нелинейного многомерного объекта, организованное управление обеспечивает типовой характер формирования электромагнитного момента при минимизации тепловых потерь в условиях минимума реактивной мощности, учитывая нелинейность характеристики намагничивания синхронного двигателя. Быстрое изменение тока ротора в условиях ограничения напряжения достигается за счет использования размагничивающего действия реакции якоря. Представлены результаты моделирования. Потери в стали не учитываются.

Abstract: The paper considers the application of the method for synthesizing multidimensional control of a synchronous machine with electromagnetic excitation of a high-speed electric drive. Using variational methods and the inverse model method for a nonlinear multidimensional object, organized control provides a typical character of the formation of an electromagnetic moment in minimizing heat losses in conditions of minimum reactive power, taking into account the nonlinearity of the magnetization characteristic of a synchronous motor. A rapid change in the rotor current under voltage-limiting conditions is achieved by using the effect of the demagnetizing action of the armature reaction. The results of modeling are presented. Losses in steel are not taken into account.

Ключевые слова: энергоэффективное управление, быстродействующий электропривод, синхронная машина с электромагнитным возбуждением, метод последовательного синтеза управления.

Key words: efficient management, high-speed electric drive, method of sequential synthesis of control.

ВВЕДЕНИЕ

При необходимой степени управляемости и отсутствии ограничений почти любая цель

управления может быть достигнута за счет «навязывания» управляемому объекту новой «искусственной» динамики. Но эффект влияния принимаемых решений на показатели качества

зависит от уровня ограничения управлений. Выходные сигналы регуляторов, обычно кратковременные по длительности и значительные по амплитуде, ограничиваются и не приводят к желаемым свойствам работы электропривода. К таким электроприводам относятся системы с большими коэффициентами усиления, системы с релейными регуляторами, системы управления, синтезированные посредством функции Ляпунова.

Наиболее широкое распространение получило управление электроприводом при стабилизации потокосцепления, позволяя рассматривать электрическую машину в виде одномерной структуры, где в качестве выходной величины выступает только электромагнитный момент. Динамика процессов определена полосой пропускания контуров регулируемых переменных, нелинейно связанных с электромагнитным моментом. Быстродействие системы управления определено возможностью источника питания и ограничено полосой пропускания контуров регулируемых переменных. Когда все ресурсы управления исчерпаны, снижать время формирования электромагнитного момента в одномерной структуре управления не представляется возможным. В такой системе, осуществляя предварительное намагничивание, поддерживать потокосцепление на номинальном уровне при различной нагрузке электропривода энергетически не эффективно.

Известна «Система 6-зонного адаптивно-оптимального векторного управления асинхронным электроприводом, формируя управление для 9-мерного векторного пространства состояний электромеханического преобразователя в динамике» [1].

Для экономичного управления электроприводом известные решения поиска экстремального управления [2] носят численный характер, рассматривая объектно-ориентированные модели, упрощающие применение численных процедур. При организации скалярного управления такой подход не позволяет контролировать динамические процессы, внося существенные искажения регулирования, требуя индивидуального подхода к каждой электрической машине. Формирование экстремального управления по одному критерию качества на упрощенной модели не дает возможности оценить другие критерии, показатели которые могут быть такими плохими, что сформированное управление не может быть целесообразным. Используя некоторую избыточность управления электрической машиной, сформирована энергооптимальная система, построенная на базе методов градиентного управления и прямого регулирования электромагнитного момента [3]. Нелинейность характеристики намагничивания в

совокупности с нелинейной связью регулируемых переменных и электромагнитного момента, значительно усложняют задачу управления в условиях ограничения напряжения. Известно управление синхронной машиной при минимизации реактивной мощности в условиях стабилизации потокосцепления статора [4]. В такой системе, в силу действия реакции якоря, на обмотке возбуждения наводится значительное напряжение в динамических процессах, не позволяя быстро изменять электромагнитный момент.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Синхронные машины с электромагнитным возбуждением средней мощности применяются в электроприводах металлургической, металлообрабатывающей промышленности. Обмотка возбуждения двигателя выполняется таким образом, чтобы минимизировать в ней потери, существенно увеличивая ее инерционность. Большая индуктивность обмотки ротора не позволяет быстро изменять ток возбуждения, что и определило основной способ управления при стабилизации тока ротора. Такое управление характеризуется существенным ростом реактивной мощности при увеличении нагрузки. Не эффективное использование мощности, подводимой к обмоткам двигателя в условиях ограничения напряжения источника питания, не позволяет быстро изменять электромагнитный момент и снижает диапазон регулирования скорости в области высоких скоростей. Предварительное намагничивание магнитной системы двигателя определяет зависимость энергетических свойств электропривода от нагрузки.

В работах [5 - 7] предложен к обсуждению метод последовательного синтеза управления машинами переменного тока. Электрическая машина представлена в виде многомерного объекта, характеризуемого несколькими входными воздействиями и выходными величинами, нелинейно связанными с регулируемыми переменными. Предлагаемое управление позволяет наряду с формированием электромагнитного момента регулировать энергетические свойства электропривода. Регулирование осуществляется посредством регулятора, обеспечивающего заданное соотношение регулируемых переменных, при котором достигаются желаемые свойства.

В докладе рассматривается применение метода последовательного синтеза для формирования многомерного управления синхронной машиной электромагнитного возбуждения электропривода средней мощности. Сформированное управление обеспечивает высокое быстродействие электропривода за счет пропорционального изменения регулируемых переменных с

одинаковым темпом. Регулирование энергетических свойств осуществляется путем изменения положения векторов в функции скорости, тока или насыщения магнитной системы двигателя. Условие изменения состояния электрической машины за минимальное время получены в результате решения задачи Лагранжа в понтрягинской форме [8] на примере синтеза управления нелинейным многомерным объектом. Для организации управления применен метод обратной модели с линеаризацией по выходу [9]. Используя условия изменения состояния электрической машины за минимальное время [10] выполнен структурно параметрический синтез управления, обеспечивающего типовой характер формирования всех выходных величин. Быстрое изменение тока ротора, при ограничении напряжения синхронно машины, осуществляется за счет эффективного использования размагничивающего действия реакции якоря.

В качестве регулируемых переменных выступают потокосцепления, позволяя наиболее просто учесть нелинейность характеристики намагничивания [11]. Их вычисление осуществляется наблюдателем состояния путем измерения углового положения ротора, тока и управления [12].

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Постановка задачи следующая. В области допустимых управлений сформировать вектор напряжения, обеспечивающего изменение состояния синхронной машины электромагнитного возбуждения за минимальное время при формировании электромагнитного момента и одновременном регулировании энергетических свойств электропривода. Полоса пропускания контуров регулируемых переменных ограничена на заданном уровне, который определен возможностью силовой части электропривода. Под допустимым управлением понимается все множество управлений позволяющих сформировать предписанные значения выходных величин. В качестве ограничений выступают дифференциальные связи (1) с начальными условиями равными нулю. Фазовые ограничения в аналитической части работы не учитываются. При формировании управления, путем вычисления отношения потокосцепления в воздушном зазоре к току намагничивания, учитывается насыщение магнитной системы двигателя. Основное уравнение движения не рассматривается, полагая, что темп изменения электромагнитного момента электропривода существенно превышает темп изменения скорости. Это допущение, не искажая конечного результата, дает возможность уменьшить порядок уравнений и получить решение в аналитическом виде (11), рассматривая

угловую скорость ω как медленно изменяющийся параметр.

Математическое описание представлено уравнениями, описывающими состояние синхронного двигателя электромагнитного возбуждения в системе вращающихся координат d, q , ориентированной по току ротора $i_{rq} = 0, i_{rd} = i_r$:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \mathbf{V}\Psi + \mathbf{U}_{dq}; \mathbf{V} = -\mathbf{R}\mathbf{L}^{-1} - \omega p \mathbf{D}, \quad (1)$$

$$\mathbf{U}_{dq} = [u_d \quad u_q \quad u_r]^T; \left\{ \sum_{i=1}^n u_i^2 \leq u_{ogr}^2 \right\} \subset \Omega,$$

$$\mathbf{U}_{dq} \subset \Omega \quad \forall t \in [t_0, t_1]; \quad \Omega \subset \bar{\mathbf{R}}^n; \quad i = \overline{1, n},$$

$$\mathbf{R} = \text{diag} \{ R_s \quad R_s \quad R_r \}; \quad \mathbf{I} = [i_d \quad i_q \quad i_r]^T,$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m \\ 0 & L_s & 0 \\ L_m & 0 & L_r \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{L}^{-1}\Psi; \quad L_s = L_m + L_{\sigma}; \quad L_r = L_m + L_{\sigma}; \quad L_m = \frac{\Psi_0}{I_0}, \quad (2)$$

$$I_0 = \sqrt{(i_d + i_{rd})^2 + (i_q)^2},$$

$$\Psi_0 = \sqrt{(\Psi_d - L_{\sigma} i_d)^2 + (\Psi_q - L_{\sigma} i_q)^2},$$

$$\Psi = \mathbf{B}\psi; \quad \mathbf{B}^T = [b_d \quad b_q \quad b_{rd}]; \quad \Psi = [\psi_d \quad \psi_q \quad \psi_{rd}]^T$$

$$b_d = \cos(\beta); \quad b_q = \sin(\beta), \quad (3)$$

$$b_{rd} = \frac{\cos(\beta) [(L_r L_s - L_m^2) \text{tg}(\beta)^2 + L_m^2 \text{tg}(\beta) \text{tg}(\varphi) + L_r L_s]}{(L_m L_s (\text{tg}(\beta) \text{tg}(\varphi) + 1))}$$

$$\psi = L_s i \cos(\varphi) [\text{ctg}(\beta) + \text{tg}(\varphi)] = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2}, \quad (4)$$

$$m = \frac{3}{2} \Psi^T \mathbf{L}^{-1} \mathbf{D} \Psi = \frac{3}{2} p \psi i \cos(\varphi), \quad (5)$$

$$Q = \frac{3}{2} \omega p \Psi^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{I} = \frac{3}{2} \omega p \psi i \sin(\varphi), \quad (6)$$

$$\Delta P = \frac{3}{2} (R_s i^2 + R_r i_r^2); \quad \Delta P = \min; \quad Q = 0,$$

$$T = \int_0^t dt \rightarrow \min, \quad (7)$$

где \mathbf{U}_{dq} – вектор напряжения (1) ограничен u_{ogr} по модулю в области Ω допустимых управлений пространства $\bar{\mathbf{R}}^n$, где $n = 3$ число каналов регулирования; \mathbf{L} – матрица индуктивностей; $L_{\sigma}, L_{\sigma r}$ – индуктивности рассеивания обмоток статора и ротора; L_s, L_r – полные индуктивности обмоток; L_m – взаимная индуктивность (2) обмоток статора и ротора; ψ – модуль вектора потокосцепления статора (4); Q – реактивная мощность (6); m – электромагнитный момент (5); T – критерий качества (7); угол β определяют положение

вектора потокосцеплений статора Ψ относительно тока ротора i_r ; φ – угол, характеризует положение вектора электродвижущей силы e от потокосцепления статора относительно тока статора (6). Пренебрегая падением напряжения на активном сопротивлении обмоток двигателя, оценка $\cos(\varphi)$ не будет отличаться от стандартной оценки, обусловленной фазовым сдвигом тока статора относительно основной гармоники напряжения, подводимого к обмоткам двигателя.

ВЫБОР РЕГУЛЯТОРА

Путем структурно параметрического синтеза, используя метод обратной модели с линеаризацией по выходу, сформировано управление. Вектор напряжения организован таким образом, чтобы в совокупности с обратными связями по регулируемым переменным он отражал задание u_{ref} выходной величины (5) и задание энергетических свойств системы (1), сформированное посредством определенного выбора аргументов β , φ матрицы \mathbf{B}_{ref} .

$$\frac{d\{\mathbf{B}\psi^2\}}{dt} = \mathbf{f}(\{\mathbf{B}\psi^2\}, u_{ref}); \quad \mathbf{U}_{dq} = -\mathbf{K}\Psi + \frac{\Psi_{ref}}{T_z} \quad (8)$$

$$\Psi_{t=0} = 0; \quad \Psi_{ref} = \frac{2}{3} \mathbf{B}_{ref} \frac{[\text{ctg}(\beta) + \text{tg}(\varphi)]}{p\psi} L_s u_{ref}, \quad (9)$$

$$-(\mathbf{V} - \mathbf{K}) = \mathbf{E} \mathbf{T}_z^{-1}; \quad \mathbf{K} = \mathbf{E} \mathbf{T}_z^{-1} + \mathbf{V}, \quad (10)$$

$$m(t) = u_{ref} (1 - e^{-\frac{2t}{T_z}}) \quad (11)$$

Выбор аргументов осуществляется посредством функций энергетического состояния [14], связывающих силовые и энергетические характеристики электропривода. Исходя из условий стационарности [8], определенный выбор коэффициентов матрицы \mathbf{K} (10) регулятора управления (8), обеспечивает изменение состояния синхронной машины за минимальное время в условиях заданного ограничения полосы пропускания контуров регулируемых переменных. Применение П - регулятора управления обусловлено его простым математическим описанием.

Аналитическое решение системы (1) показывает, электромагнитный момент (11), при управлении (8), изменяется в два раза быстрее относительно управления при стабилизации тока ротора. Положение векторов на всем временном интервале отвечает заданному значению, обеспечивая требуемые свойства электропривода. При ограничении напряжения высокое быстродействие достигнуто за счет форсирования управляющих воздействий сразу по всем каналам регулирования. Результаты моделирования на

рис.1 и рис. 2. подтверждают верность аналитического решения задачи управления.

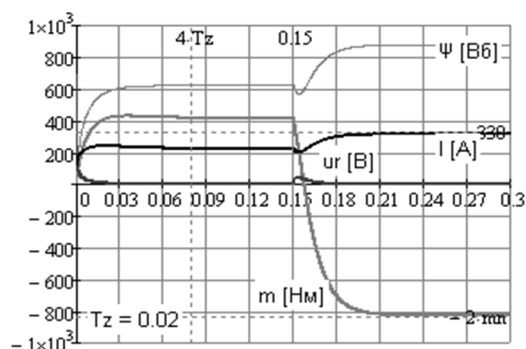


Рис. 1. Процессы формирования электромагнитного момента m , потокосцепления Ψ , тока I статора и напряжения ротора u_r при начальных условиях равных нулю

В качестве объекта управления рассматривается синхронная машина мощностью 62 кВт с постоянной времени обмотки ротора в 10 раз больше постоянной времени обмоток статора. Линейное напряжение 380 В, ток 146 А. В переходных режимах значительных скачков напряжения на обмотке возбуждения не наблюдается, что отражено на рис.1.

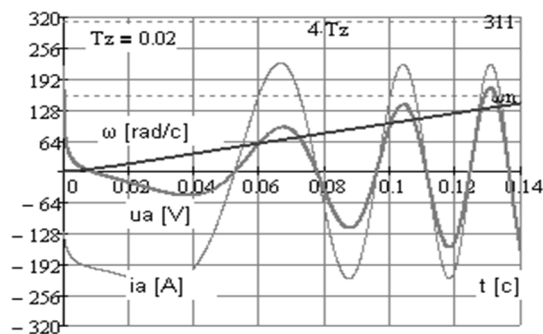


Рис. 2. Изменение скорости ω , фазного тока i_a и напряжения u_a при формировании электромагнитного момента без предварительного намагничивания двигателя в условиях минимума реактивной мощности и минимизации потерь

При двукратной нагрузке номинальной величины модуль потокосцепления статора равен 0.86 Вб, время формирования электромагнитного момента составляет $2T_z$, где T_z^{-1} определяет ограничение полосы пропускания контуров регулируемых переменных. Ограничение управления выполнено на уровне $220\sqrt{2}$ В. Совпадение фазного тока и напряжения на рис. 2 говорит о выполнении условий минимума реактивной мощности при управлении (8).

ВЫВОД

Рассмотрено применение метода последовательного синтеза многомерного управления синхронной машиной электромагнитного возбуждения. Предлагаемое управление позволяет наряду с формированием электромагнитного момента регулировать заданные энергетические свойства электропривода посредством регулятора, обеспечивающего необходимое соотношение регулируемых переменных в функции насыщения магнитной системы двигателя. Влияние насыщения магнитной системы двигателя на динамику процессов формирования электромагнитного момента мала сказывается.

Используя вариационные методы и метод обратной модели с линеаризацией по выходу для нелинейного многомерного объекта, путем структурно параметрического синтеза организовано управление электроприводом. Предлагаемое управление обеспечивает типовой характер изменения всех выходных величин, учитывая нелинейность связи регулируемых переменных и электромагнитного момента.

В условиях одинакового ограничения напряжения снижение времени формирования электромагнитного момента относительно одноканальной структуры достигается за счет форсирования управления сразу по всем каналам регулирования.

Областью применения рассмотренного метода синтеза управления являются электропривода металлургической, металлообрабатывающей промышленности, где к технологическим процессам предъявляются высокие динамические и энергетические требования в условиях существенного изменения нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мищенко В. А. Теория способы и системы векторного и оптимального векторного управления электроприводами переменного тока: дис....док. техн. наук: 05.09.03 / Владислав Алексеевич Мищенко. – Москва. 2010. – 298 с.
2. Поляков В. Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов: дис....док. техн. наук: 05.09.03 / Владимир Николаевич Поляков. – Екатеринбург. 2009 – 495 с.
3. Семькина И. Ю. Повышение энерго и ресурсоэффективности горных машин средствами

регулируемого электропривода: дис....док. техн. наук: 05.09.03 / Ирина Юрьевна Семькина. – Кемерово. 2013 – 312 с.

4. Вейнгер А. М. Регулируемый синхронный электропривод / А. М. Вейнгер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
5. Симаков, Г. М. Метод последовательного синтеза энергетически эффективного управления электроприводом переменного тока / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов // 16 научно – техническая конференция ЭПТТ 2015 «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург, 2015. – С 123 – 126.
6. Филюшов Ю. П. Метод оптимального синтеза управляющих воздействий машины переменного тока. / Электротехника. 2012. № 8. С. 8 – 28.
7. Патент: №2092967 РФ, Н 02 Р 21 / 00. Электропривод с синхронным двигателем / Ю. П. Филюшов. Заявка № 95113680. Подано 27. 07. 95. Опубликовано 10. 10. 97. Билл. изобрет. – 1997. – № 28. – 6с.: ил.
8. Алексеев, В. М. Оптимальное управление. / В. М. Алексеев, В. М. Тихомиров, С. В. Фомин – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 430 с.
9. Филюшов В. Ю. Линеаризация нелинейного трехканального динамического объекта обратной связью / В. Ю. Филюшов // Научный вестник НГТУ. – 2017. – том 66. – №1 – С. 43 – 49.
10. Воевода, А. А. Синтез алгоритма управления многоканальным объектом /А. А. Воевода, Ю. П. Филюшов//Вестник РГРТУ. 2017.– №61.– С.88– 95
11. Свидетельство о регистрации электронного ресурса: № 22381 от 14 декабря 2016. Программа «Модель системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами, учитывающая нелинейность характеристики намагничивания»/ Р. Н. Хамитов, Ю. П. Филюшов. – М.: ОФЭРНИО, 2016. – 3с.: ил.
12. Н. Kubota, K. Matsuse, T. Nakano. DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor / IEEE Trans. Ind. Applicat. March/April 1993, vol. 29, no. 2, pp. 344-348.
13. Филюшов, Ю. П. Оптимизация электромагнитных процессов в синхронной машине/ Ю. П. Филюшов, В. Ю. Филюшов // Электричество. – 2011.– № 8.– С. 57 – 62.
14. Симаков, Г. М. Энергоэффективное управление электроприводом переменного тока / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов. – Новосибирск: Изд. – во НГТУ, 2016. – 245 с.